

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-075825

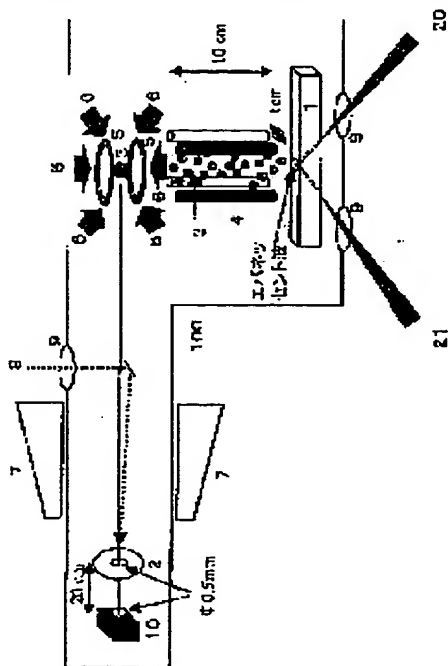
(43)Date of publication of application : 15.03.2002

(51)Int.Cl. H01L 21/027
G03F 7/20
G03H 1/08
G03H 1/16
G03H 1/22

(21)Application number : 2000-256315 (71)Applicant : COMMUNICATION
RESEARCH LABORATORY

(22)Date of filing : 25.08.2000 (72)Inventor : OMUKAI RYUZO

(54) METHOD OF FORMING FINE PATTERN



(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an atomic lithography by which a free pattern can be drawn, in contrast to the conventional atomic lithography by which a striped or latticed pattern is achievable but only a simple graphic can be drawn approximately, by utilizing the interaction of light and atoms in the same manner as in the conventional atomic lithography in this method.

SOLUTION: The surface of a plate having transmittance is irradiated with atomic beams at low speed to an extent that the atomic beams are attracted to the plate, the plate is irradiated obliquely with laser beams detuned in high

frequency in approximately several GHz from the resonance frequency of the atoms from the rear of the plate and total reflection is generated, and atomic beams are reflected in regions having high intensity of evanescent wave emitted toward the plate surface, and attracted in regions having low evanescent wave intensity. A desired atomic drawing pattern can be prepared in size corresponding to a laser-beam diameter on a substrate by forming the pattern by a holographic image, and the pattern can be made small to the diffraction limit of light.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 25.08.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3316513

[Date of registration] 14.06.2002

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-75825

(P2002-75825A)

(43) 公開日 平成14年3月15日 (2002.3.15)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーム(参考)
H 0 1 L 21/027		G 0 3 F 7/20	5 0 5 2 H 0 9 7
G 0 3 F 7/20	5 0 5	G 0 3 H 1/08	2 K 0 0 8
G 0 3 H 1/08		1/16	5 F 0 4 6
1/16		1/22	
1/22		H 0 1 L 21/30	5 0 2 D
		審査請求 有	請求項の数 7 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2000-256315(P2000-256315)

(22) 出願日 平成12年8月25日 (2000.8.25)

(71) 出願人 301022471

独立行政法人通信総合研究所

東京都小金井市貫井北町4-2-1

(72) 発明者 大向 隆三

兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡588-2 郵

政省通信総合研究所 関西支所内

(74) 代理人 100082669

弁理士 福田 賢三 (外2名)

Fターム(参考) 2H097 BA02 BB01 CA17 LA10

2K008 AA00 CC01 EE01 FF21 FF27

HH03

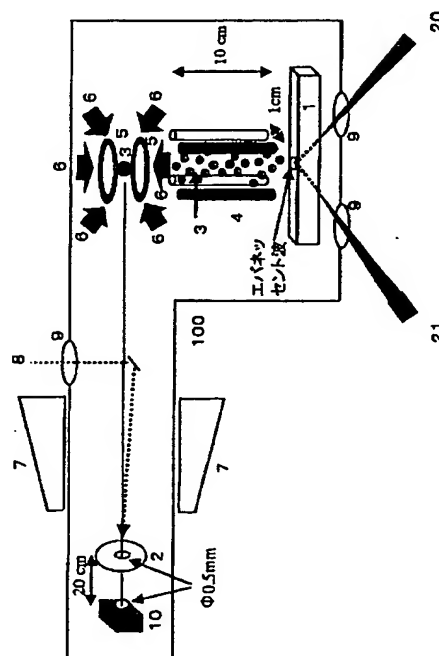
5F046 AA28 BA10

(54) 【発明の名称】 微細パターンの形成方法

(57) 【要約】

【課題】 従来の原子リソグラフィー法では、縞状や格子状の紋様は実現されているが、簡単な図形を描画できる程度であった。この発明は、従来の原子リソグラフィー法と同様に光と原子の相互作用を用いているが、自由なパターンを描画することができる原子リソグラフィー法を提供することを目的とする。

【解決手段】 透過率を持つ平板の表面に、平板に吸着する程度に低速な原子ビームを照射し、その裏面からは、その原子の共鳴周波数から数GHz程度、高い周波数に離調したレーザー光を平板に斜めに照射して全反射を生じさせ、そのとき平板表面に出射するエバネッセン波強度の強い領域では、原子ビームを反射し、弱い領域では吸着せしめるものである。そのパターンを、ホログラム像で作ることにより、基板でのレーザービーム径に応じたサイズで所望の原子描画パターンを作成でき、光の回折限界まで小さくできる。



特開2002-75825

(2)

2

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 電磁波の伝播できる物体の、少なくともその一部の表面が平坦である部分を含む第一の表面に、該物体内で電磁波が全反射する条件で電磁波を入射する手続と、上記の全反射の起こる位置にある第二の表面から出射するエバネッセント波に、該第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続と、該第二の表面に、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用エネルギーが該ガス体の構成要素の運動エネルギーより大きいガス体を照射する手続と、該ガス体の構成要素の一部を該第二の表面に吸着させる手続と、を含むことを特徴とする微細パターンの形成方法。

【請求項2】 電磁波の伝播できる物体の、少なくともその一部の表面が平坦である部分を含む第一の表面に、該物体内で電磁波が全反射する条件で電磁波を入射する手続と、該表面が平坦な平板である部分の他方の表面である第二の表面から出射するエバネッセント波に、該第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続と、該第二の表面に、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用エネルギーが該ガス体の構成要素の運動エネルギーより大きいガス体を照射する手続と、該ガス体の構成要素の一部を該第二の表面に第一の吸着物を吸着させる手続と、該吸着物の有無により選択的に第二の吸着物を吸着させる手続と、を含むことを特徴とする微細パターンの形成方法。

【請求項3】 請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の第一の表面の位置に応じた電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴とする微細パターンの形成方法。

【請求項4】 請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に、上記の第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の第一の表面の位置にレーザー光によるホログラム像を投影して電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴とする微細パターンの形成方法。

【請求項5】 請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に、上記の第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の第一の表面の位置に電磁波の透過に関するマスク像を投影して電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴とする微細パターンの形成方法。

【請求項6】 請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に、上記の第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の物体の厚さの位置的な変化、上記の物体の電磁波の透過率の位置的な変化、上記

の第一の表面反射率の位置的变化、あるいは上記の第一の表面の光吸収率の位置的变化のいずれかにより電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴とする微細パターンの形成方法。

【請求項7】 電磁波の伝播できる物体の、少なくともその一部の表面が平坦である部分を含む第一の表面に、ガス体を吸着させる手続と、該物体内で電磁波が全反射する条件で電磁波を入射する手続と、上記の全反射の起こる位置にある第二の表面から出射するエバネッセント波について、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用により生じる力が該ガス体の構成要素と該物体との吸着力よりも大きく、該吸着したガス体が飛散する条件で該第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続と、を含むことを特徴とする微細パターンの形成方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、基板上にパターンを形成する微細パターンの形成方法に関し、特に原子あるいは分子の運動をレーザー光によって制御し基板上へ堆積させることにより微小な構造物を作成する技術（原子リンググラフィー）において、所望の微細パターンを基板上に自由に描く原子リンググラフィーに関するものである。

【0002】

【従来の技術】縮小光学系を用いて、サブミクロン領域のパターンを形成することは、半導体集積回路の製造に広く用いられている。この方法では、微細パターンを形成する物体の表面に感光性レジスト剤を塗布し、縮小光学系を用いて微細パターンを焼き付けた後、上記の感光性レジスト膜をエッチングマスクとして、上記の物体の表面をエッチングし、必要で無くなった感光性レジスト膜を除去して、望みの微細パターンを形成する、というプロセスが用いられている。この方法では、感光性レジスト膜を用いることから、これに含まれる微塵の不純物が、上記の微細パターンを形成する物体の表面に堆積し、その電気特性に影響を与えるという欠点があった。また、微細パターンを描く方法として、縮小光学系を用いて一括露光する他に、細く絞った電子線を用いて描画する事も行われている。しかし、この方法は、逐次露光であるうえに、やはり一般に感光性レジスト剤が用いられるため、上記の場合と同じ問題があった。

【0003】また、最近では、光の定在波と電気的に中性な原子との相互作用を用いた方法が注目されている。例えば文献1（G.Timp, et al., "Using Light as a Lens for Submicron, Neutral-Atom Lithography", Phys. Rev. Lett., 69,1636-1639,1992）には、特にそのFig. 1に示される構成で、波長589nmのレーザー光を用いて、直径300μm程度の定在波を形成し、その光線方向と直角の方向に、平均速度が740m/sと低速な原子束を運送することにより、縞状の紋様で線幅10nm程度

(3)

特開2002-75825

3

にできる見出しが記載されている。また、文献2 (A.S. Bell, et al., "Atomic Lithography", Microelectronic Engineering 41/42, 587-590, 1998) には、特に文献2のFig. 1 (a) に示される構成で、2枚の反射板と425nmのレーザー光を用いて格子状の紋様を持った定在波を発生させることにより、用いた光の波長の2/3の周期 (283.7nm) の格子点群を生成した旨報告されている。この際、クロム原子線を発生させ、レーザー冷却法を用いて運動方向が平行化された原子線とし、クロム原子の共鳴遷移を引き起こす波長に近い波長のレーザー光を用いていることも特徴のひとつである。

【0004】良く知られている様に、原子の共鳴遷移波長よりも長い波長のレーザー光を使用した場合、原子はその光の場の中で光強度の大きい領域に向かう力を受ける。逆に共鳴遷移波長よりも短い波長のレーザー光の場合は、原子はレーザー光強度の小さい領域に向かう力を受ける。上記の文献2においては、この特性を用いて、シリコン基板上に、上記のパターンを形成しており、感光性レジスト剤が用いられていないため、汚染されずらいという特徴がある。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかし、従来の微細パターンの形成方法では、上記の文献1、2に示されているように縞状や格子状の紋様は実現されているが、定在波を用いているため、今後改善されるにしても、多角形程度の簡単な図形を描画することが限界である。

【0006】この発明は上記に鑑み提案されたもので、上記の従来の方法と同様に、光と原子の相互作用を用いているが、自由なパターンを一括して描画することができる微細パターンの形成方法を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、光と原子の相互作用を用いて自由なパターンを描画することができる微細パターンの形成方法であり、電磁波の伝搬できる物体の、少なくともその一部の表面が平坦である部分を含む第一の表面に、該物体内で電磁波が全反射する条件で電磁波を入射する手続と、上記の全反射の起こる位置にある第二の表面から出射するエバネッセント波に、該第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続と、該第二の表面に、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用エネルギーが、該ガス体の構成要素の運動エネルギーより大きいガス体を照射する手続と、該ガス体の構成要素の一部を該第二の表面に吸着させる手続と、を含むことを特徴としている。

【0008】また、請求項2に記載の発明は、光と原子の相互作用を用いて自由なパターンを描画することができる微細パターンの形成方法で、吸着のマスク材を形成するためのものであり、電磁波の伝搬できる物体の、少な

4

くともその一部の表面が平坦である部分を含む第一の表面に、該物体内で電磁波が全反射する条件で電磁波を入射する手続と、上記の全反射の起こる位置にある第二の表面から出射するエバネッセント波に、該第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続と、該第二の表面に、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用エネルギーが該ガス体の構成要素の運動エネルギーより大きいガス体を照射する手続と、該ガス体の構成要素の一部を該第二の表面に第一の吸着物を吸着させる手続と、該吸着物の有無により選択的に第二の吸着物を吸着させる手続と、を含むことを特徴としている。

【0009】また、請求項3に記載の発明は、入射する電磁波の強弱によりパターンを形成させるためのものであり、上記した請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の第一の表面の位置に応じた電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴としている。

20 【0010】また、請求項4に記載の発明は、単色光の特徴を活用して描画するためのものであり、上記した請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に、上記の第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の第一の表面の位置にレーザー光によるホログラム像を投影して電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴としている。

30 【0011】また、請求項5に記載の発明は、特に大きなパターンを形成するときに便利な方法であり、上記した請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に、上記の第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の第一の表面の位置に電磁波の透過に関するマスク像を投影して電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴としている。

40 【0012】また、請求項6に記載の発明は、その表面にパターンを形成する平板の構造を用いて、その表面のパターンを形成するために、上記した請求項1あるいは2に記載の微細パターンの形成方法において、上記の第二の表面から出射するエバネッセント波に、上記の第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続は、上記の物体の厚さの位置的な変化、上記の物体の電磁波の透過率の位置的な変化、上記の第一の表面反射率の位置的な変化、あるいは上記の第一の表面の光吸収率の位置的な変化のいずれかにより電磁波の強弱をつける手続を含む手続であることを特徴としている。

50 【0013】また、請求項7に記載の発明は、吸着工程とパターンニング工程とを独立して行うために、電磁波の伝搬できる物体の、少なくともその一部の表面が平坦である部分を含む第一の表面に、ガス体を吸着させる手

(4)

特開2002-75825

5

続きと、該物体内で電磁波が全反射する条件で電磁波を入射する手続と、上記の全反射の起こる位置にある第二の表面から射出するエバネッセント波について、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用により生じる力が該ガス体の構成要素と該物体との吸着力よりも大きく、該吸着したガス体が飛散する条件で該第二の表面の位置に応じた強弱をつける手続と、を含むことを特徴としている。

【0014】

【発明の実施の形態】以下にこの発明の実施の形態を図面に基いて詳細に説明する。先ず第1の実施形態を図1を用いて説明する。

【0015】図1は、高真空度（ 1.0×10^{-6} Pa 以下にしておくことが望ましい）の真空チャンパー100内で行なう本発明の原子リンググラフィーの概略を示す模式図である。まず、リンググラフィーにおいて使用するIn、Cr、Al、あるいはSi等の物質をオープン100中に入れ、その物質の蒸気圧がオープン100中で10 Pa 以上になるまで加熱することによってこの物質を蒸発させる。この蒸発気体を、蒸発した原子の飛散する方向と同軸上に並べた2個のピンホール（第1のピンホールはオープンに、第2のピンホールはコリメータ2に与えられている）を用いてコリメートし、こうしてできた原子群により、熱原子ビームを発生させる。熱原子ビームの広がり角は10mrad程度以下になるように、2個のピンホールの直径とそれらの間隔を設定する。また、この時得られる熱原子ビームの原子密度が第2のピンホールの直後において 10^6 個/cm²以上となるまでオープンの温度を上昇させ、保つことが望ましい。

【0016】この熱原子ビームの原子のもつ速度は広い分布を持っているため、良く知られた光の散乱力で原子を減速するか、速度選別することによって、低速な原子ビームを生成する。原子減速に関しては、例えば、ゼーマン同調法、周波数チャージング法または広帯域スペクトル光源を用いた減速法などを使用して原子ビーム中の原子の速度が5 m/s 以下になるまで減速する。この際、入射熱原子ビームの原子密度に対して約50%以上に相当する原子密度の原子が、速度5 m/s 以下になるまで減速することが望ましい。ゼーマン同調法におけるゼーマンコイルも真空槽外に配置することが望ましい。速度選別に関しては、例えば、文献3（F. Shimizu, et al., Chem. Phys., 145 (1990), pp.327-331）に記述された良く知られた手法を用いて、速度選別された原子ビームを空間的に分けて取り出す。これらのいずれの方法も、必要なレーザー光は真空槽外からビューポートを通して照射することが望ましい。

【0017】こうして得られた速度5 m/s 以下の減速原子ビームを原子源として、例えば文献4（E.L. Raab, et al., Phys. Rev. Lett., 59, (1987), 2631）に記載され、良く知られた磁気光学トラップ（MOT）に原子

6

を捕獲すると同時にレーザー冷却操作を施して、運動エネルギーを温度1 mK相当以下にまで冷却する。MOTはアンチヘルムホルツ型コイル5とレーザー光6によって構成する。コイル5は真空槽の内側あるいは外側のどちらに配置してもよいが、これによって生じる磁場勾配は1 mT/cm程度となるようコイルに電流を流す。MOT用レーザー光は真空槽外からビューポートを通じて6方向（ $\pm x, \pm y, \pm z$ ）から入射させる。この時のレーザー光の周波数は、通常の方法にしたがって、レーザー冷却の対象となる原子の遷移のうちの最も効率的に冷却できる遷移を選択し、その遷移周波数から、凡そその遷移の自然幅分だけ負に離調しておき、また、このときのレーザー光強度は当該原子遷移の飽和強度程度としておくことが望ましい。さらに、6本のレーザー光の偏光状態は右回り円偏光または左回り円偏光のいずれかになるように設定するが、それぞれをどちらの偏光状態に設定するかは文献4に記載の内容に従って決定する。また、上記の減速法による原子の最終減速速度、MOTで使用するアンチヘルムホルツ型コイルに流す電流値、レーザー周波数離調量、あるいはレーザー光強度については、実際にMOTで捕獲・冷却される原子の従数が最大となるよう、さらに微調整することが望ましい。

【0018】 10^6 個/cm²以上の原子密度を持つ原子集団がMOTに捕獲され、その運動エネルギーが温度1 mK相当以下にまで十分に冷却されると、MOTに使用するレーザー光の照射を中断し、冷却原子群3を重力に従って約10 cm自然落下させる。この距離を調整して、原子の運動エネルギーを調整する。この際、冷却原子は重力方向に沿って垂直に落下する様に配置する。また、原子集団が空間的に散逸せず、直径1 mm以下の領域にまで集束されて落下するに足る程度の長さまで四重極磁場を用意してその中に冷却原子群を通すことが望ましい。

【0019】このときの四重極磁場は、4本の銅ロッド（長さ10 cm）を等間隔（10 mm）に図1の様に配置し、互いに逆向き電流を流して最大磁場=15 mT（磁場勾配 30 mT/cm）程度磁場を発生させ、落下する冷却原子が横方向（落下する方向と垂直な面内の方向）への散逸を防ぎ、原子の高密度化を図るための磁気トラップとする。この磁気トラップ領域の中で、原子は次式で与えられるような力を受ける。

【数1】

$$\vec{F} = -\mu_B \nabla B$$

これによって、MOTから解放された冷却原子群は磁気トラップ中を落下する間に、4本のロッドから等距離にある軸（B=0）上にガイドされる。図1に示したように、4本の銅ロッドからちょうど等距離に有る軸上にMOTで冷却された原子群が位置し、又、その軸上の反対側に原子描画領域が位置する様に配置を構成する。磁気トラップとして使用するこの四重極磁場の磁場勾配は、ガイド

(5)

特開2002-75825

7

領域の終端（銅ロッドの最も基板に近い端）において上記冷却原子のガイド効率が最も高くなるよう（最も多くの原子をガイドでき、最も原子の高密度化が達成されるよう）に、銅ロッドに流す電流値を適して微調整することが望ましい。

【0020】原子描画の際にエバネッセント波発生のために使用するレーザー光の周波数は、冷却された原子に対して、同じ光強度、同じ能調周波数（正に離調し、その値は数GHz）の条件下で、光による双極子力を最も大きく原子に対して及ぼし得る原子の遷移の共振周波数を基準とし、それよりも数GHzだけ正に離調する。例えば、ナトリウム原子の場合は、アルゴンイオンレーザーと色素レーザーを組み合わせた構成から波長589nmのレーザー光を発生させ、その共振周波数は、ナトリウム原子の $(3S_{1/2}F=2) \rightarrow (3P_{1/2}F=3)$ の遷移に対して数GHz高周波数側へ離調する。また、クロム原子の場合は、同様にアルゴンイオンレーザー励起の色素レーザーの出力光から425nm光（クロム原子の $7S_{1/2} \rightarrow 7P$ 遷移に相当）を発生させ、その周波数を前述の遷移周波数に対して数GHz正に離調したものを使用する。また、これらで使用するレーザー光の共振周波数は、例えば文献5（W. Z. Zhao, et al., Rev. Sci. Instrum., 69 (1998), pp. 3737-3740）等に掲載されている手法を用いて安定化させることが望ましい。

【0021】基板1上で描画を行いたい2次元的空间パターンから計算によってホログラム（透過性）を作成する。この方法は、既に良く知られており、例えば、文献6（谷田貝、斎藤著、「計算機ホログラムとその応用」、精密機械、47巻12号、1981年12月、1541-1545）に記載されている方法に従ってフーリエ変換型計算機ホログラムを作成する。

【0022】このホログラムに上記のレーザー光を図3のレンズ41で絞り、描画点において所望のスポットサイズになる様に調整する。この光学系全体の模式図を図3に示す。図3は、エバネッセント波生成用レーザー光源40、レンズ41、ミラー42、ピンホール43、計算機ホログラム44、エバネッセント波生成点（全反射点）45からなる光学系を示している。図3のレンズ41からエバネッセント波生成点（全反射点）45に至る光線が図1における入射レーザー光21であり、この光線は、図1のビューポート9を通過し、基板1にあるエバネッセント波生成点（全反射点）45に照射される。

【0023】上記のレーザー光（空間強度分布をホログラムによって制御されたもの）を基板1の下面から入射させて、描画面で全反射させる。この際、計算機ホログラムによるホログラム像の場合、通常のホログラフィのように物体光と参照光という2種類の光は必要なく、再生光のみで光強度分布（光パターン）を再現できる。描画面のうち、上側（レーザー光が照射される側と

8

は逆側）には、エバネッセント波が発生する。このエバネッセント波の描画面における強度分布は、全反射面内におけるホログラフィックに生成された入射レーザー光の空間強度分布を反映する。描画面内のある点 (x, y) におけるエバネッセント波の強度分布は、描画面と垂直方向（ z 方向）には、下記の式で表わされる強度減衰を示す。

【0024】

【数2】

$$I(z) = q \cdot I_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right)$$

ここに、 z は、基板からの距離であり、 q 、 z_0 は、

【0025】

【数3】

$$q = \frac{16n^3}{[(n^2 - 1)(n^2 + 1) \cdot \cos^2 \theta]},$$

$$z_0 = \frac{\lambda}{[4\pi \cdot (n^2 \cdot \sin^2 - 1)^{1/2}]}$$

【0026】であり、 I_0 は、描画面内の点 (x, y) 上の $z=0$ における（ホログラフィックに生成された）レーザー光強度、 n は基板材料の屈折率、 θ はレーザー光の入射角、 z は基板表面からの距離を示す。これらの式が示す様に、エバネッセント波は、光の波長程度の距離で強度が減衰するため、原子に対して双極子力を及ぼす。力の向き（基板に向かって入射してくる原子に対して斥力となるか、引力となるか）は、レーザー光の周波数離調の符号（正か負か）により決まる。その符号が正のとき斥力となり、負のとき引力となる。いま、正離調にしているため、エバネッセント波は斥力により原子を反射する鏡のような働きをする。

【0027】このようなエバネッセント波の作る双極子ポテンシャルは次式で与えられる。

【数4】

$$U(z) = \frac{\hbar}{2} \cdot \delta \cdot \ln \left[1 + \frac{I(z)}{I_s} \frac{\gamma^2}{\delta^2 + \gamma^2} \right]$$

ここに、 δ はレーザーの能調量、 2γ は原子の当該遷移の自然幅、 I_s は原子の当該遷移についての飽和強度を示す。

【0028】エバネッセント波の生成に使用するレーザー光強度は、 k_B をボルツマン定数、 m を対象原子の質量、 T をMOTで冷却された原子の温度とすると、次の数5、

【0029】

9

【数5】

$$k_B \cdot T = m \cdot \langle v^2 \rangle$$

【0030】を満たす $\langle v^2 \rangle$ を用いて、次の数6の条件を基板上の原子描画位置でみたすように設定する。

【0031】

【数6】

$$\sqrt{R \cdot \langle v^2 \rangle} + 2 \cdot g \cdot l < \sqrt{\frac{2 \cdot U(0)}{m}}$$

【0032】ただし、 l （エル）は原子の自然落下距離（四重極磁場によるガイド距離）、 g は重力加速度、 m は原子の質量である。ここで、 R は、冷却原子集団中の速度分布のうちどの速度までをエバネッセント波で反射させるかを示す係数である。数6は冷却原子集団の温度 T に対して、その集団の中の $R \times T$ に相当する運動エネルギーを持つ原子までをもエバネッセント波で基板上にて反射させることのできる条件を示している。描画面の仕上がり具合や、レーザー光の強度などの装置条件を考慮して R の値を最適化することが望ましい。

【0033】また、以上のことから、レーザー光の強度を変えることによって、描画面の細線の幅を変えられることは、容易に理解できる。

【0034】自然落下してきた冷却原子3はエバネッセント波領域に入射するが、数4が満たされているので、描画面域で光が存在する部分では原子が反射される。逆に、光が存在しないところでは、原子はそのまま基板1上に到達し堆積する。そのためホログラフィックに空間強度分布を持つレーザー光でエバネッセント波を生成した場合、そのホログラフィックに生成された空間パターンに応じて原子が基板上で反射または堆積される。いったん反射された原子は、描画面中のエバネッセント波が存在しない位置または描画面外に移動するまで反射され続ける。その結果、基板面では計算機ホログラムで再生した空間パターンを反映した形状で原子が堆積する。

【0035】この実施形態において、4本の銅ロッドを使用して冷却原子のガイドを実施しているが、4本の銅ロッドに流す電流値を独立に調整し、四重極磁場の空間的プロファイルを変化させることで、冷却原子の基板上への落下位置を制御できる。即ち、原子描画面域を2次元的に制御・拡張することができることは明かである。

【0036】また、描画は必ずしもホログラムによる像を用いる必要はなく、従来のフォトリソグラフィで良く知られているフォトマスクを用いて光の強弱パターンを与えることもできる。

【0037】ここで、照射したレーザー光の空間的な変調を行なうために、基板の裏面にパターンを設けて、あるいは、基板中に吸収率の違いで構成されたパターンを設けて、描画面でのエバネッセント波の強度の強弱によ

(6)

特開2002-75825

10

るパターンを設けることによって、原子リソグラフィを行なうことは可能である。

【0038】あるいは、照射したレーザー光の空間的な変調を行なうために、基板の全反射面近傍における屈折率の空間変化を設けることによって実現可能である。図4は、基板の裏面近傍で n_1 、 n_2 の屈折率（たとえば、基板に他の物質がドーパされた場合で、基板（物質1）の屈折率が n_1 、ドーパされた物質（物質2）のそれが n_2 で $n_1 < n_2$ のとき）がある場合を示す。図4（b）では、光の入射角が θ_1 で、真空と物質2の界面では全反射が起こって基板表面上にエバネッセント波が発生する場合を示し、図4（c）では、物質1と物質2の界面で全反射するが、光の入射角が θ_2 で、全反射が起こって基板表面上にエバネッセント波が発生する場合を示している。一方、図4（a）では、 θ_1 、 θ_2 のどの角度にたいしても真空と物質1の界面で全反射が起こり、エバネッセント波が発生することを示している。

【0039】従って、物質1と物質2の界面での全反射の臨界角より大きい入射角で光を入射することにより、物質2のある位置では、基板内部でエバネッセント波が発生しするため、表面での強度は、その深さに応じて減衰する。また、物質2のない位置では、 θ_1 、 θ_2 のどの角度にたいしても、エバネッセント波は基板表面で発生する。この様に、物質2のある、なし、によって、基板表面のエバネッセント波強度を制御できる。例えば、基板としてのBK7（光学ガラス）にサファイア（Al₂O₃）をドーパすることにより、屈折率を1.5〜1.76に変化させることができ、エバネッセント波生成のためのレーザー光入射面におけるレーザー光入射角が59°以上になるように装置構成をとることにより、上記の方法を用いることができる。

【0040】以上の例では、基板1にMOTによって冷却された原子集団3が、四重極磁場中でガイドされて基板に垂直な方向にそって堆積する場合を示したが、図2に示したように、基板面に対して角度 θ をなす角の方向から原子（分子）ビームを照射し、原子（分子）描画を行うことも可能である。この場合、入射原子ビーム中の原子の最高速度を v_1 として、原子描画位置では、 m を対象原子の質量とすると、

【0041】

【数7】

$$v_1 \cdot \cos \theta < \sqrt{\frac{2 \cdot U(0)}{m}}$$

【0042】を満たすように、原子の速度を制御するか、速度選別するか、入射角度を選択するか、エバネッセント波生成用の光強度および離調周波数を調節するか、あるいはそれらを相互に調節する。

【0043】上記の説明においては、単一の原子線について述べたが、上述の実施内容を複数種の原子を対象に

11

行うこともできる。このためには、減速された複数の原子層を用いて、MDTで信獲・冷却したあと、基板上へ落下させて所望の描画パターンを基板上へ作製する。ただし、使用する原子径に応じて、それぞれに必要な波長のレーザー光を用意するものとする。この際、例えば異なるホログラム像を用いることにより、原子径によって異なる描画パターンを基板上へ描くこともできる。

【0044】以上の実施の形態では、基板上に原子ビームとレーザー光を同時に照射する例について説明した。上記の説明において用いたレーザー光よりも十分に強力な光を用いることができる場合は、先に基板上に原子ビームの吸着を行なって原子層を形成し、これに、上記と同様に正偏調の単色光を照射することにより発生するエバネッセント波により、十分に強度のある光が照射された部分では、上記の原子層の原子が飛散し、光の当たらなかった部分では吸着されたまま原子層が残ることになる。

【0045】ここで、吸着された原子層が、吸着されたことにより、その吸収スペクトル線が周波数シフトを示したり、線幅の増加を示す場合があるが、その場合は、照射するレーザー光の周波数に関して、所望の効果を発現するために最適な値を探ってその値に同調することによって、また、吸収スペクトル線幅が増加した場合でも、十分に強度のある光を照射することによって、上記の様に、吸着した原子を飛散せしめることが可能である。

【0046】この方法による利点は、原子ビームの速度を減速する必要のないことである。従って、装置が簡略化され、製造コストが低廉する。

【0047】また、この方法の利点は、今まで述べてきた計算機ホログラムなどを用いた手法のほかに、レーザー光を空間掃引することによっても、基板上で所望の描画を行うことができる点である。これにより、光の回折限界まで集束されたレーザー光の使用も可能であり、基板上でそのレーザービーム径に応じた微細な線幅を持つパターンの逐次描画を行うこともできる。

【0048】以上の説明では、電磁波として、特にレーザー光を用いたが、容易に理解できるように単色光であれば他の光源による光を用いることができる。例えば、素粒子加速器による自由電子レーザーや放射光を単色化した光でも、上記と同様な効果が期待できるのは、明かである。

【0049】

【発明の効果】この発明は上記した構成からなるので、以下に説明するような効果を奏することができる。

【0050】請求項1に記載の発明では、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用を用いるため、従来の方法の様に反射板を用いた定在波を用いなくても、描画面に、原子を所望のパターンで定着できるようになった。

(7)

特開2002-75825

12

【0051】また、請求項2に記載の発明では、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用を用いて、描画面に、原子、分子あるいは微粒子を定着した表面を、引き続き次の工程に適切な物質に置きかえることができるようになった。

【0052】さらに、請求項3に記載の発明では、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用を用いて、光の強弱パターンを、描画面に、原子の有無として定着できるようになった。

10 【0053】さらに、請求項4に記載の発明では、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用を用いて、ホログラム像による光の強弱パターンを、描画面に、原子の有無として定着できるようになり、基板でのレーザービーム径に応じたサイズで所望の原子描画パターンを作成できるというホログラム像の利点を用いることができるようになった。

【0054】さらに、請求項5に記載の発明では、エバネッセント波とガス体の構成要素との相互作用を用いて、フォトマスクによる光の強弱パターンを、描画面に、原子の有無として定着できるようになり、光の強弱パターンの発生が簡便になった。

【0055】さらに、請求項6に記載の発明では、予めパターンを持った物体を付けた基板を用いて微細パターンの形成方法を適用することができるようになり、微細な構造物の構造を定着できるようになった。

【0056】さらに、請求項7に記載の発明では、先に原子層を吸着してしまうため、原子冷却が必要なくなり、装置の簡単化を図ることができた。

【図面の簡単な説明】

30 【図1】本発明の原子リソグラフィーの概略を示す模式図である。

【図2】エバネッセント波と原子ビームとの原子描画面での相互作用を示すための図である。

【図3】計算機ホログラムを用いたエバネッセント波生成用の空間強度分布を持つレーザー光源の配置を示す図である。

【図4】基板上に、異なる屈折率の領域を形成することにより、表面でのエバネッセント波の強度を空間的に変調する原理を説明するための概念図である。

【符号の説明】

- 1 基板
- 2 コリメーター用ピンホール
- 3 冷却原子
- 4 冷却原子ガイド用四重極磁場（磁気トラップ）
- 5 アンチヘルムホルツ型コイル
- 6 磁気光学トラップ用レーザー光
- 7 ゼーマン同調減速用ソレノイドコイル
- 8 ゼーマン同調減速用レーザー光
- 9 ビューポート
- 50 10 原子オープン（ピンホール付き）

(8)

特開2002-75825

13

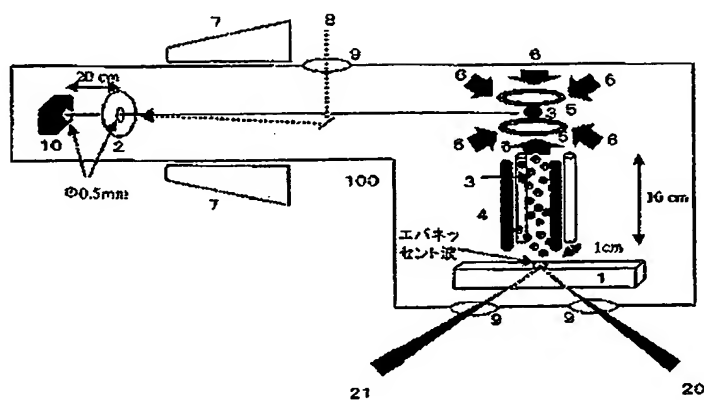
14

- 20 出射レーザー光
 21 入射レーザー光
 30 減速原子ビーム
 31 反射原子ビーム
 40 エバネッセント波生成用レーザー光源
 41 レンズ

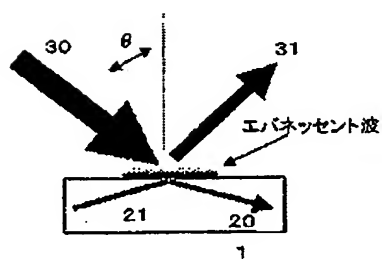
- * 42 ミラー
 43 ビンホール
 44 計算機プログラム
 45 エバネッセント波生成点(全反射点)
 100 真空チャンバー

*

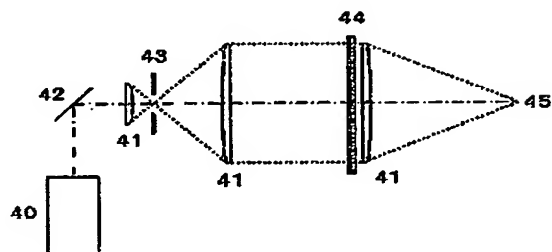
【図1】



【図2】



【図3】



【図4】

